

УДК 630*524.39+630*174.754

ВИДОСПЕЦИФИЧНАЯ АЛЛОМЕТРИЯ И «ВСЕОБЩАЯ» МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ НАДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ РОДА *PRUNUS* L.: МЕТА-АНАЛИЗ

В. А. УСОЛЬЦЕВ – доктор сельскохозяйственных наук,
профессор кафедры прикладной информатики,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
620100, Россия, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
главный научный сотрудник
ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН»,
620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а,
тел.: 8 (343) 254 61 59, e-mail: Usoltsev@mail.ru

А. Ф. УРАЗОВА – кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
620100, Россия, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37,
тел.: 8 (343) 254 61 59, e-mail: ura-alina@mail.ru

А. В. БОРНИКОВ – кандидат сельскохозяйственных наук,
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»,
460014, Россия, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18
тел.: 8 (353) 277 71 94, e-mail: bornikov87@mail.ru

И. С. ЦЕПОРДЕЙ – младший научный сотрудник
ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН»
620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а,
тел.: 8-904-177-93-63, e-mail: Usoltsev@mail.ru

Ключевые слова: род *Prunus* L., черемуха, аллометрические модели, мета-анализ, биомасса деревьев, фракционный состав, обобщенная модель.

Нарастающие катастрофические сценарии последствий глобального потепления определяют актуальность оценки углероддепонирующей способности планетарной растительности, причем не только на лесопокрываемых площадях, но и на урбанизированных территориях. Поэтому исследование структуры биомассы древесных и кустарниковых растений, культивируемых в зелёных насаждениях, имеет важное значение для улучшения среды обитания как на урбанизированных территориях, так и в целом на планете, однако имеющиеся сведения о структуре биомассы таких растений крайне скудны. Объектом нашего исследования явились шесть видов рода *Prunus* L., для которых ранее в пяти странах были опубликованы аллометрические модели биомассы, характеризующиеся высокими коэффициентами детерминации. Однако насколько применима каждая такая модель, рассчитанная для данного вида в данном регионе, для оценки биомассы этого же вида в данном регионе или другого вида в другом регионе, неизвестно. Для снятия этой неопределенности нами применен мета-анализ как статистическая процедура, объединяющая результаты нескольких независимых исследований с целью нахождения общей закономерности. В результате получена обобщающая модель фракционного состава биомассы рода *Prunus*, которая характеризуется высокими коэффициентами детерминации и может быть применена для оценки структуры биомассы для любого вида данного рода с известным диапазоном отклонений от расчетных значений.

SPECIES-SPECIFIC ALLOMETRY AND A GENERIC MODEL OF THE ABOVEGROUND BIOMASS STRUCTURE OF THE GENUS *PRUNUS* L.: A META-ANALYSIS

V. A. USOLTSEV – doctor of agricultural sciences, professor
Ural State Forest Engineering University,
Botanical Garden of Ural Branch of RAS

A. F. URAZOVA – candidate of agricultural sciences
Ural State Forest Engineering University

A. V. BORNIKOV – candidate of agricultural sciences,
Orenburg State Agrarian University

I. S. TSEPORDEY – junior researcher
Botanical Garden of Ural Branch of RAS

Keywords: *genus Prunus L., allometric models, meta-analysis, tree biomass, component composition, generic model.*

Increasing catastrophic scenarios of global warming consequences determine the relevance of assessing the carbon-depositing capacity of planetary vegetation, not only in forested areas, but also in urbanized territories. In this regard, the study of the biomass structure of woody and shrub plants cultivated in urbanized territories is becoming of increasingly important, but the available information upon the biomass structure of such plants is extremely scarce. The objects of our study are six species of the genus *Prunus* L., for which allometric models of biomass characterized by high determination coefficients were previously published in five countries. However, it is not known, how applicable each such model calculated for a given species in a given region, for estimating the biomass of the same species in the same region or another species in another region. To remove this uncertainty, we used meta-analysis as a statistical procedure that combines the results of several independent studies to find a common pattern. As a result, the generic model of the biomass component composition of the genus *Prunus* is obtained, which is characterized by high determination coefficients and can be used to estimate the biomass structure for any species of this genus with the known range of deviations from the theoretical values.

Введение

Во всем мире с целью смягчения последствий климатических изменений интенсивно проводится оценка биомассы и биологической продукции лесных деревьев, депонирующих атмосферный углерод. Поскольку нарастающие климатические изменения порождают ожидания катастрофических сценариев для планетарной биоты [1], исследования биосферной роли зеленых растений постепенно охватывают не только лесные территории, но и земли сельскохозяйственного пользования [2, 3, 4], а также

лесопарковое хозяйство городов [5, 6, 7]. Наряду с этим зеленые насаждения городов играют значительную санитарно-гигиеническую и экологическую роль [7, 8, 9, 10, 11, 12], особенно важную в условиях прогрессирующей урбанизации территорий. Поэтому исследование структуры биомассы древесных и кустарниковых растений, культивируемых в зеленых насаждениях, приобретает все возрастающее значение [13].

Имеются по меньшей мере два способа обобщения научных результатов. Один из традицион-

ных подходов состоит в том, что некий авторитетный эксперт пишет обзорную статью, анализируя текущее состояние знаний и предлагая направления будущих исследований. Второй подход представлен мета-анализом, который преследует ту же цель, но его методология имеет количественную основу [14, 15].

Исходные фактические данные о биомассе деревьев, получаемые исследователями на пробных площадях, в научной печати публикуются крайне редко. Обычно подобная информация представлена в виде аллометрических

уравнений биомассы. Обобщение подобных уравнений на основе количественных методов относится к категории мета-анализа как «анализа анализов» или статистического обобщения результатов независимых исследований с целью нахождения общих закономерностей [16]. Несмотря на критику мета-анализа, характеризующую его как «гигантский шаг назад», «упражнение в мегаглупости» и «статистическую алхимию XXI века», количество публикаций с применением мета-анализа непрерывно нарастает, сторонники мета-анализа называют его «волной в будущее», а область его применения охватывает диапазон от «астрономии до зоологии» [17, 18].

Известно строгое и устойчивое аллометрическое соотношение между биомассой дерева и его диаметром [19, 20]. Проводятся интенсивные исследования применимости так называемых «всеобщих» аллометрических моделей (generic, generalized, common models), которые обеспечивали бы аллометрической модели приемлемую точность при оценке биомассы деревьев в любых условиях произрастания [21, 22]. Хотя то или иное всеобщее уравнение характеризуется высокими показателями адекватности, в наших предыдущих работах показано, что его использование при определении биомассы деревьев или [23] и лиственницы [24] в локальных географических регионах даёт существенные смещения. Сегодня мнения исследователей разделились: одни считают некорректной экстра-

поляцию обобщённых моделей биомассы на другие регионы [22, 25], другие единодушны в выводе о возможном широком использовании обобщённых уравнений зависимости биомассы лишь от диаметра ствола [26, 27, 28, 29, 30].

В нашем исследовании принята попытка моделирования и анализа видоспецифичных и «всеобщих» аллометрических уравнений биомассы на примере различных видов рода *Prunus* L. с использованием как первичных данных, так и опубликованных аллометрических уравнений с применением процедуры мета-анализа.

Prunus — род растений семейства Rosaceae, включает около 250 видов, распространённых главным образом в северных умеренных областях земного шара (<http://www.theplantlist.org/1.1/browse/A/Rosaceae/Prunus/>). Многие представители рода — широко известные плодовые культуры. В русскоязычной литературе представителями рода *Prunus* являются: вишня (*P. cerasus* L.), слива домашняя (*P. domestica* L.), персик (*P. persica* L.), абрикос обыкновенный (*P. armeniaca* L.), миндаль обыкновенный (*P. dulcis* Mill.), черешня (*P. avium* L.), черёмуха обыкновенная (*P. padus* L.), алыча (*P. divaricata* L.) и др.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования явились шесть видов рода *Prunus* L. Исходные данные для мета-анализа структуры биомассы

деревьев представлены опубликованными исходными материалами для видов *P. padus* L. (Западная Сибирь) [31] и *P. ssiori* F. Schmidt (Япония) [32, 33] и опубликованными аллометрическими уравнениями для видов *P. serotina* Ehrh. (Италия) [34], *P. avium* L. (Германия) [4], *P. virginiana* L. (США) [35, 36] и *P. pensylvanica* L. (США) [35, 36, 37] (табл. 1).

В табл. 1 приведены значения регрессионных коэффициентов a и b , а также коэффициентов детерминации $adjR^2$ аллометрических уравнений, имеющих вид

$$\ln P_i = a + b \ln D, \quad (1)$$

где P_i — биомасса i -й фракции (листва, ветви, ствол) в абсолютно сухом состоянии, кг; D — диаметр ствола на высоте груди, см.

Фактические данные о биомассе *P. padus* и *P. ssiori* обработаны по стандартной программе регрессионного анализа, и результаты расчета представлены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

На рисунке показано графическое представление уравнения (1) по каждой фракции отдельно. Графики для надземной биомассы построены по значениям, полученным суммированием соответствующих расчетных значений. Очевидно, что линии регрессии для разных видов рода *Prunus* L. укладываются в сравнительно узком координатном поле, особенно для биомассы стволов и надземной, где они визуальнo практически неразличимы. Это создает предпосылку

Таблица 1

Table 1

Характеристика аллометрических уравнений (1) надземной биомассы рода *Prunus* L.Characteristic of allometric equations (1) of above-ground biomass of the genus *Prunus* L.

Фракция биомассы Biomass components	Размер выборки Sample size	Диапазон диаметров, см Diameter range, cm	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>adjR</i> ² *
(1) Черёмуха обыкновенная, Западная Сибирь (<i>P. padus</i> L.). [31]					
Листва Foliage	8	0,5 – 6,0	–2,9651	1,2473	0,994
Ветви Branches	8	0,5 – 6,0	–2,5626	1,8727	0,987
Ствол Stem	8	0,5 – 6,0	–1,7626	1,6678	0,972
(2) Черёмуха поздняя, Северная Италия (<i>P. serotina</i> Ehrh.). [34]					
Листва	47	7–36	–4,6052	2,0100	0,907
Ветви	47	7–36	–4,6052	2,9300	–
Ствол	47	7–36	–1,7148	2,1200	–
(3) Черёмуха Съори, Япония (<i>P. ssiori</i> F. Schmidt). [32, 33]					
Листва	12	3 – 18	–4,6840	1,9714	0,670
Ветви	12	3 – 18	–3,7402	2,3949	0,847
Ствол	12	3 – 18	–2,5628	2,4650	0,979
(4) Вишня птичья (черешня), Германия (<i>P. avium</i> L.). [4]					
Листва	–	–	–	–	–
Ветви	39	2 – 26	–4,6250	2,9650	0,969
Ствол	39	2 – 26	–2,2280	2,2900	0,988
(5) Черёмуха виргинская, США (<i>P. virginiana</i> L.). [36]					
Листва	16	3 – 15	–3,4451	1,3356	0,749
Ветви	16	3 – 15	–2,1236	1,1932	0,742
Ствол	16	3 – 15	–2,1388	1,9936	0,918
(6) Черёмуха виргинская, США (<i>P. virginiana</i> L.). [35]					
Листва	16	3 – 8	–3,4204	1,3307	0,595
Ветви	16	3 – 8	–2,1637	1,2191	0,560
Ствол	16	3 – 8	–2,1533	2,0038	0,848
(7) Черёмуха пенсильванская, США (<i>P. pensylvanica</i> L.) [36]					
Листва	30	3 – 24	–3,8971	2,0380	0,783
Ветви	30	3 – 24	–3,2040	1,9197	0,932
Ствол	30	3 – 24	–2,3528	2,2988	0,991
(8) Черёмуха пенсильванская, США (<i>P. pensylvanica</i> L.) [35]					
Листва	30	3 – 15	–3,9221	1,9784	0,904
Ветви	30	3 – 15	–3,1213	1,8755	0,871
Ствол	30	3 – 15	–2,3465	2,2988	0,982
(9) Черёмуха пенсильванская, США (<i>P. pensylvanica</i> L.) [37]					
Листва	6	6 – 42	–4,5488	1,9130	0,946
Ветви	6	6 – 42	2,5370	2,5170	0,925
Ствол	6	6 – 42	4,7390	2,2890	0,997

* *adjR*² – коэффициент детерминации, скорректированный на число параметров.

для расчета «всеобщей» аллометрической модели.

Все аллометрические уравнения табл. 1 протабулированы по задаваемым значениям диаметра ствола и полученные матрицы мета-данных отдельно для листьев, ветвей, ствола и надземной части дерева обработаны по программе регрессионного анализа согласно функции Корсуня – Бакмана [38, 39].

$$\ln P_i = a + b \ln D + c (\ln D)^2. \quad (2)$$

Названная функция отличается от простой аллометрии (1) введением дополнительной независи-

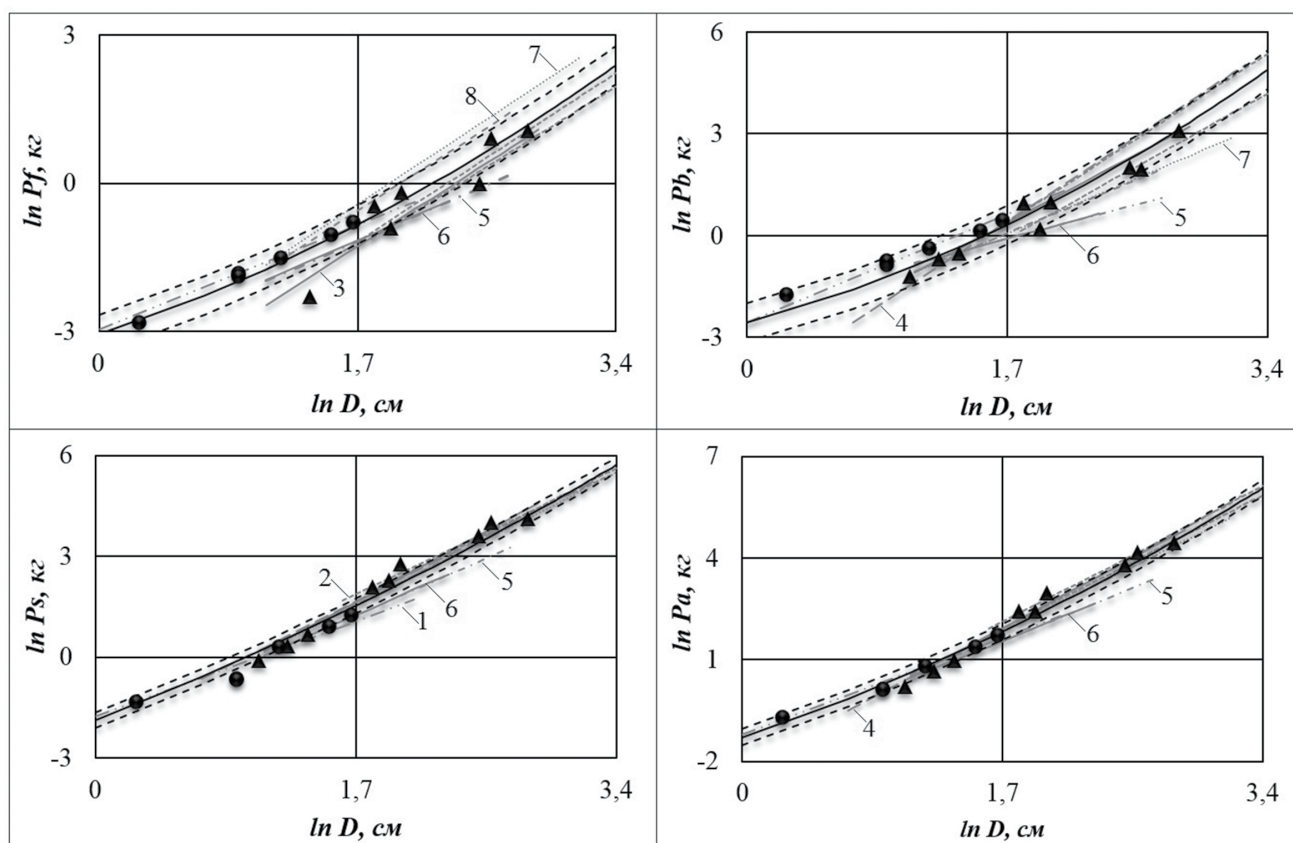
мой переменной $(\ln D)^2$. Это вызвано тем, что в аллометрической модели константа масштабирования (аллометрическая константа) изменяется по мере увеличения размера дерева [40]: у мелких деревьев замер диаметра на высоте груди смещается к апексу, и тем самым простое аллометрическое соотношение становится нелинейным в логарифмических координатах (см. рисунок).

Характеристика полученных «всеобщих» уравнений дана в табл. 2.

Все константы в табл. 2 характеризуются высокой степенью

адекватности на уровне вероятности $P_{0,99}$. Зависимость средних значений соответствующих фракций от диаметра ствола показана на рисунке сплошной жирной линией, а стандартная ошибка уравнения – пунктирной.

Процедура логарифмирования выравнивает остаточную дисперсию, делая ее более равномерной. В исходных (арифметических) координатах дисперсия неоднородна, т. е. наибольшие отклонения от теоретической линии регрессии наблюдаются у крупных деревьев, и эти отклонения уменьшаются по мере



Зависимость фракций биомассы (P_i , кг) деревьев различных видов рода *Prunus* от диаметра ствола на высоте груди (D , см) в логарифмических координатах. P_f , P_b , P_s и P_a – соответственно биомасса листьев, ветвей, ствола и надземная. Цифрами обозначены лишь те виды, линии регрессии которых распознаваемы на рисунке (см. табл. 1). Фактические данные для *P. padus* обозначены кружками, а для *P. ssiori* – треугольниками

Dependence of biomass components (P_i , kg) of trees of different species of the genus *Prunus* on the stem diameter at breast height (D , cm) in logarithmic coordinates. P_f , P_b , P_s and P_a are the biomass of foliage, branches, stems and aboveground, respectively. Numbers indicate the species of the genus *Prunus* presented in the Table. 1. The actual data for *P. quadus* are indicated by circles, and for *P. ssiori* by triangles

снижения величины диаметра ствола на высоте груди. Поскольку при практическом использовании уравнений (2) представляют интерес фактические, а не логарифмированные отклонения (см. рисунок), в табл. 3 представлены результаты табулирования

уравнений (2), приведенные к исходным единицам измерения, где M означает средний тренд, $+\sigma$ и $-\sigma$ – соответственно верхнее и нижнее стандартные отклонения, которые одинаковы в логарифмических единицах, но становятся неравными после ре-

трансформации к исходным единицам.

Из данных табл. 3 видно, что отклонения биомассы от теоретических значений существенно возрастают по мере увеличения диаметра ствола, однако в %-ном выражении этого не происходит.

Таблица 2

Table 2

Характеристика «всеобщих» уравнений (2) надземной биомассы рода *Prunus*
Characteristic of generic equations (2) of above-ground biomass of the genus *Prunus*

Фракция биомассы Biomass components	a	b	c	$adjR^2$	Стандартная ошибка Standard error of equation
Листья Foliage	-3,0599	1,0088	0,1752	0,919	1,47
Ветви Branches	-2,5579	1,1951	0,2919	0,906	1,77
Ствол Stem	-1,8729	1,7678	0,1361	0,984	1,25
Надземная Aboveground	-1,2870	1,5036	0,1936	0,982	1,27

Таблица 3

Table 3

Расчетные зависимости фракций биомассы деревьев рода *Prunus* от диаметра ствола
с соответствующими стандартными отклонениями
Theoretical dependences of tree biomass components of the genus *Prunus* upon the stem diameter with
corresponding standard deviations

D , см D , cm	Масса листьев, кг Foliage mass, kg			Масса ветвей, кг Branch mass, kg			Масса ствола, кг Stem mass, kg			Надземная масса, кг Aboveground mass, kg		
	M	$+\sigma$	$-\sigma$	M	$+\sigma$	$-\sigma$	M	$+\sigma$	$-\sigma$	M	$+\sigma$	$-\sigma$
2	0,10	0,15	0,07	0,20	0,36	0,11	0,56	0,70	0,45	0,86	1,09	0,68
4	0,27	0,39	0,18	0,71	1,26	0,40	2,32	2,90	1,85	3,22	4,08	2,54
6	0,50	0,74	0,34	1,68	2,98	0,95	5,7	7,1	4,5	7,60	9,6	6,0
8	0,81	1,2	0,55	3,3	5,8	1,9	11,0	13,7	8,8	14,5	18,4	11,5
10	1,2	1,8	0,82	5,7	10,1	3,2	18,6	23,2	14,8	24,6	31,1	19,4
12	1,7	2,5	1,2	9,1	16,2	5,2	28,9	36,1	23,1	38,3	48,5	30,2
14	2,3	3,3	1,5	13,8	24,5	7,8	42,2	52,8	33,7	56,2	71,3	44,3
16	2,9	4,3	2,0	20,1	35,5	11,3	59,0	73,8	47,1	79,0	100	62,3
18	3,7	5,5	2,5	28,1	49,6	15,9	79,6	99,5	63,6	107	136	84,7
20	4,6	6,8	3,2	38,1	67,5	21,6	104	130	83,3	142	180	112
22	5,7	8,3	3,8	50,6	89,6	28,6	134	167	107	183	232	144
24	6,8	10,0	4,6	65,9	116	37,3	168	210	134	232	294	183
26	8,0	11,8	5,5	84,3	149	47,6	207	259	166	289	366	228
28	9,5	13,9	6,4	106	188	60,0	253	316	202	355	450	280
30	11,0	16,2	7,5	132	233	74,7	304	380	243	431	547	340

Независимо от толщины ствола отклонения составляют: для массы листвы – от +45 до –32 %, для массы ветвей – от +76 до –43 %, для массы ствола – от +25 до –20 % и для надземной массы – от +27 до –21 %.

Уравнения для разных видов рода *Prunus* характеризуются довольно высоким коэффициентом детерминации и объясняют от 60 до 90 % изменчивости массы листвы, от 56 до 99 % – ветвей и от 85 до 99 % – стволов (см. табл. 1). Однако какие отклонения от теоретических значений дают приведенные в табл. 1 уравнения, неизвестно. Полученная обобщенная для рода *Prunus* модель харак-

теризуется не только высокими коэффициентами детерминации (92, 91 и 98 % соответственно для массы листвы, ветвей и ствола), но и диапазонами отклонений, которые можно иметь при оценке биомассы деревьев рода *Prunus*, независимо от видовой принадлежности.

Выводы

1. Имеющиеся в литературе данные о структуре биомассы деревьев рода *Prunus* представлены в основном видоспецифичными аллометрическими моделями, характеризующимися довольно высокими коэффициентами детерминации.

2. Насколько применима каждая из ранее опубликованных моделей, рассчитанных для данного вида в данном регионе, для оценки биомассы этого же вида в данном регионе или другого вида в другом регионе, было неизвестно.

3. Предложенная обобщенная модель для биомассы деревьев в пределах рода *Prunus* характеризуется высокими коэффициентами детерминации и может быть применена для оценки структуры биомассы для любого вида данного рода с известным диапазоном отклонений от расчетных значений.

Библиографический список

1. Ripple, W. J. World Scientists' Warning of a Climate Emergency / W. J. Ripple, Ch. Wolf, T. M. Newsome, P. Barnard, W. R. Moomaw et al. // *BioScience*. – 2019. – biz088. DOI:10.1093/biosci/biz088.
2. Kumar, B. M. Carbon sequestration potential of agroforestry systems: Opportunities and challenges / B. M. Kumar, P. K. R. Nair (Eds.) // Springer, Dordrecht ; Heidelberg ; London ; New York, 2011. – 307 p. – DOI: 10.1007/978-94-007-1630-8.
3. Lorenz, K. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems: A review / K. Lorenz, R. Lal // *Agronomy for Sustainable Development*. – 2014. – Vol. 34. – No. 2. – P. 443–454. – DOI: 10.1007/s13593-014-0212-y.
4. Aboveground woody biomass allocation and within tree carbon and nutrient distribution of wild cherry (*Prunus avium* L.) – a case study / C. Morhart, J. P. Sheppard, J. K. Schuler, H. Spiecker // *Forest Ecosystems*. – 2016. – Vol. 3: 4. – DOI: 10.1186/s40663-016-0063-x.
5. Чернышенко, О. В. Поглотительная способность и устойчивость древесных растений в озеленении Москвы / О. В. Чернышенко // *Городское хозяйство и экология*. – 1996. – № 1. – С. 37–39.
6. Бабурин, А.А. Оценка экологической значимости зеленых насаждений / А. А. Бабурин, Г. Ю. Морозова // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. – 2009. – Т. 14. – № 3. – С. 63–70.
7. Лебедев, А.В. Динамика продуктивности и средообразующих свойств древостоев в условиях городской среды (на примере Лесной опытной дачи Тимирязевской академии) : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук : 06.03.02 / Лебедев Александр Вячеславович. – Москва : Санкт-Петербургский гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, 2019. – 20 с.
8. Сергейчик, С. А. Газопоглотительная способность растений и аккумуляция в них элементов промышленных загрязнений / С. А. Сергейчик // *Оптимизация окружающей среды средствами озеленения*. – Минск : Наука и техника, 1985. – С. 68–75.
9. Скрипальщикова, Л. Н. Пылеаккумулирующая способность сосновых и березовых фитоценозов лесостепных районов Сибири / Л. Н. Скрипальщикова // *География и природные ресурсы*. – 1992. – № 1. – С. 39–44.

10. Санитарно-защитные зоны промышленных объектов Екатеринбурга и опыт использования липы мелколистной для их озеленения / Л. И. Аткина, Г. В. Агафонова, А. Л. Агафонова, И. В. Осипов // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2008. – № 3. – С. 24–27.
11. Прусаченко, А. В. Экотоксикологическая оценка загрязнений тяжелыми металлами урбаноземов города Курска : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук : 03.02.08 / Прусаченко Андрей Викторович. – Москва : Моск. с.-х. акад. им. К. А. Тимирязева, 2011. – 20 с.
12. Бачурина, А. В. Оценка качества среды на территории г. Новотроицка Оренбургской области по состоянию березы повислой / А. В. Бачурина, Е. А. Куликова // Леса России и хозяйство в них. – 2019. – Вып. 2 (69). – С. 30–37.
13. Аткина, Л. И. Особенности формирования надземной фитомассы яблони ягодной (*Malus baccata* L.) и боярышника кроваво-красного (*Crataegus sanguinea* L.) в городских посадках Екатеринбурга / Л. И. Аткина, М. В. Игнатова // Леса России и хозяйство в них. – 2009. – Вып. 4 (34). – С. 52–58.
14. Iyengar, S. Much ado about meta-analysis / S. Iyengar // Chance : New directions for statistics and computers. – 1991. – Vol. 4. – P. 33–40.
15. Nakagawa, S. Meta-analytic insights into evolutionary ecology: An introduction and synthesis / S. Nakagawa, R. Poulin // Evolutionary Ecology. – 2012. – Vol. 26. – P. 1085–1099. – DOI: 10.1007/s10682-012-9593-z.
16. Проблемы оценки биопродуктивности лесов в аспекте биогеографии : 1. Мета-анализ как способ обобщения результатов независимых исследований / В. А. Усольцев, С. О. Р. Шубаири, Дж. А. Дар, В. П. Часовских, Е. В. Марковская // Эко-потенциал. – 2017в. – № 4 (20). – С. 10–34. – URL: http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/7016/1/ek-4-17_03.pdf
17. Petticrew, M. Systematic reviews from astronomy to zoology : myths and misconceptions / M. Petticrew // British Medical Journal. – 2001. – Vol. 322. – P. 98–101.
18. Козлов, М. В. Воздействие точечных источников эмиссии поллютантов на наземные экосистемы: представление результатов в публикациях / М.В. Козлов, Е.Л. Воробейчик // Экология. – 2012. – № 4. – С. 43–251.
19. Кофман, Г. Б. Рост и форма деревьев / Г. Б. Кофман. – Новосибирск : Наука, 1986. – 211 с.
20. Forest biomass allometry in global land surface models / A. Wolf, P. Ciais, V. Bellassen, N. Delbart, C. B. Field, J. A. Berry // Global Biogeochemical Cycles. – 2011. – Vol. 25. – Issue 3. – GB3015. – P. 1–16. DOI:10.1029/2010GB003917.
21. Enquist, B.J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants / B. J. Enquist, K. J. Niklas // Science. – 2002. – Vol. 295 (5559). – P. 1517–1520. – DOI: 10.1126/science.1066360.
22. Wirth, C. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation / C. Wirth, J. Schumacher, E.-D. Schulze // Tree Physiology. – 2004. – Vol. 24. – P. 121–139. – DOI: 10.1093/treephys/24.2.121.
23. Усольцев, В. А. Фиктивные переменные и смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев (на примере *Picea* L.) / В. А. Усольцев, К. В. Колчин, М. П. Воронов // Эко-потенциал. – 2017а. – № 1 (17). – С. 22–39. – URL: <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6502/1/eko-17-02.pdf>
24. Усольцев, В. А., Смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев лиственницы / В. А. Усольцев, К. В. Колчин, А. А. Маленко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017б. – № 4 (150). – С. 85–90. – URL: <http://www.asau.ru/vestnik/2017/4/085-090.pdf>
25. Muukkonen, P. Biomass equations for European trees: Addendum / P. Muukkonen, R. Mäkipää // Silva Fennica. – 2006. – Vol. 40. – No. 4. – P. 763–773.
26. Tritton, L. M. Biomass estimation for northeastern forests / L. M. Tritton, J. W. Hornbeck // Bulletin of the Ecological Society of America. – 1981. – Vol. 62. – P. 106–107.

27. Pastor, J. Biomass prediction using generalized allometric regressions for some Northeast tree species / J. Pastor, J. D. Aber, J. M. Melillo // *Forest Ecology and Management*. – 1984. – Vol. 7. – P. 265–274.
28. Singh, T. Generalizing biomass equations for the boreal forest region of west-central Canada / T. Singh // *Forest Ecology and Management*. – 1986. – Vol. 17. – P. 97–107.
29. Feller, M. C. Generalized versus site-specific biomass regression equations for *Pseudotsuga menziessi* var. *menziesii* and *Thuja plicata* in Coastal British Columbia / M. C. Feller // *Bioresource Technology*. – 1992. – Vol. 39. – P. 9–16.
30. Allometry and biomass of Korean pine (*Pinus koraiensis*) in central Korea / Y. Son, J. W. Hwang, Z. S. Kim, W. K. Lee, J. S. Kim // *Bioresource Technology*. – 2001. – Vol. 78. – P. 251–255.
31. Габеев, В. Н. Биологическая продуктивность лесов Приобья / В. Н. Габеев. – Новосибирск : Наука, 1976. – 171 с.
32. Land use and management of Japanese beech natural forests in east-northern district of Japan (Investigation of forest biomass and forest production) / M. Mori, M. Inuma, A. Sato, K. Saito // *Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council* : “Report of Comprehensive studies on conservation technology in agriculture, forestry, and Fishery environments”. – Report 5, 1979. – P. 83–93.
33. Stand biomass, net production and canopy structure in a secondary deciduous broad-leaved forest, northern Japan / K. Takahashi, K. Yoshida, M. Suzuki, T. Seino, T. Tani, N. Tashiro, T. Ishii, S. Sugata, E. Fujito, A. Naniwa, G. Kudo, T. Hiura, T. Kohyama // *Research Bulletin of the Hokkaido University Forests*. – 1999. – Vol. 56. – P. 70–85.
34. Biomass functions for the two alien tree species *Prunus serotina* Ehrh. and *Robinia pseudoacacia* L. in floodplain forests of Northern Italy / P. Annighöfer, I. Mölder, S. Zerbe, H. Kawaletz, A. Terwei, C. Ammer // *European Journal of Forest Research*. – 2012. – Vol. 131. – P. 1619–1635. – DOI: 10.1007/s10342-012-0629-2.
35. Ribe, J. H. Puckerbrush weight tables. Life Sciences and Agricultural Experiment Station / J. H. Ribe ; University of Maine, Orono, MN. Miscellaneous Report 152, 1973. – 92 p.
36. Young, H. E. Weight tables for tree and shrub species in Maine / H. E. Young, J. H. Ribe, K. Wainwright ; Life Sciences and Agriculture Experiment Station, University of Maine at Orono, Miscellaneous Report 230, 1980. – 84 p.
37. Busing, R. Biomass and production of southern Appalachian cove forests reexamined / R. Busing, E. Clebsch, P. White // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1993. – Vol. 23. – P. 760–765. – DOI: 10.1139/x93-100.
38. Korsun, F. Zivot normalniho porostu ve vzorcich / F. Korsun // *Lesnická Práce*. – 1935. – Vol. 14. – P. 335–342.
39. Backman, G. Drei Wachstumsfunktionen (Verhulst’s, Gompertz’, Backman’s.) / G. Backman // *Wilhelm Roux’ Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen*. – 1938. – Vol. 138. – P. 37–58.
40. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents / H. Poorter, A. M. Jagodzinski, R. Ruiz-Peinado, S. Kuyah, Y. Luo, J. Oleksyn, V. A. Usoltsev, T. N. Buckley, P. B. Reich, L. Sack // *New Phytologist*. – 2015. – Vol. 208. – Issue 3. – P. 736–749. DOI: 10.1111/nph.13571/epdf.

Bibliography

1. Ripple, W. J. World Scientists’ Warning of a Climate Emergency / W. J. Ripple, Ch. Wolf, T. M. Newsome, P. Barnard, W. R. Moomaw et al. // *BioScience*. – 2019. – biz088. DOI:10.1093/biosci/biz088.
2. Kumar, B. M. Carbon sequestration potential of agroforestry systems: Opportunities and challenges / B. M. Kumar, P. K. R. Nair (Eds.) // Springer, Dordrecht ; Heidelberg ; London ; New York. – 2011. – 307 p. – DOI: 10.1007/978-94-007-1630-8.

3. Lorenz, K. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems: A review / K. Lorenz, R. Lal // *Agronomy for Sustainable Development*. – 2014. – Vol. 34. – No. 2. – P. 443–454. – DOI: 10.1007/s13593-014-0212-y.
4. Aboveground woody biomass allocation and within tree carbon and nutrient distribution of wild cherry (*Prunus avium* L.) – a case study / C. Morhart, J. P. Sheppard, J. K. Schuler, H. Spiecker // *Forest Ecosystems*. – 2016. – Vol. 3: 4. – DOI: 10.1186/s40663-016-0063-x.
5. Chernyshenko, O. V. Absorption capacity and stability of woody plants in Moscow landscaping / O. V. Chernyshenko // *Uzban economy and ecology*. – 1996. – No. 1. – P. 37–39.
6. Baburin, A. A. Assessment of the ecological significance of planting collard greens / A. A. Baburin, G. Yu. Morozova // *Bulletin of the Pacific State University*. – 2009. – Vol. 14. – No. 3. – P. 63–70.
7. Lebedev, A. V. Dynamics of productivity and environment-forming properties of stands in the urban environment (on the example of a Forest experimental dacha of the Timiryazev Academy): PhD Thesis: 06.03.02. / Alexander Lebedev. – Moscow: St.-Petersburg State Forest Engineering University, 2019. – 20 p.
8. Sergeychik, S. A. Gas-absorbing capacity of plants and accumulation of elements of industrial pollution in them / S. A. Sergeychik // *Optimization of the environment by means of gardening*. – Minsk : Nauka i Tekhnologiya, 1985. – P. 68–75.
9. Skripalschikova, L. N. Dust-accumulating capacity of pine and birch phytocenoses of forest-steppe regions of Siberia / L. N. Skripalschikova // *Geography und natural resource*. – 1992. – No. 1. – P. 39–44.
10. Sanitary protection zones of industrial objects of Yekaterinburg and experience of lime using for their gardening / L. I. Atkina, G. V. Agafonova, A. L. Agafonova, I. V. Osipov // *Bulletin of the Moscow State University of forest (Forest Bulletin)*. – 2008. – No. 3. – P. 24–27.
11. Prusachenko, A. V. Ecotoxicological assessment of pollution with heavy metals of urban soils of the Kursk city : PhD Thesis: 03.02.08 / Prusachenko Andrey Viktorovich. Moscow : K. A. Timiryazev Moscow Agrarian Academy, 2011. – 20 p.
12. Bachurina, A. V. Assessment of the quality of the environment on the territory of Novotroitsk, Orenburg region, according to the state of the *Betula pendula* / A. V. Bachurina, E. A. Kulikova // *Forests of Russia and Their Management*. – 2019. – Vol. 69. – No. 2. – P. 30–37.
13. Atkina, L. I. Features of formation of aboveground phytomass of Apple berry (*Malus baccata* L.) and blood-red hawthorn (*Crataegus sanguinea* L.) in urban plantings of Yekaterinburg / L. I. Atkina, M. V. Ignatova // *Forests of Russia and Their Management*. – 2009. – Vol. 34. – No. 4. – P. 52–58.
14. Iyengar, S. Much ado about meta-analysis / S. Iyengar // *Chance : New directions for statistics and computers*. – 1991. – Vol. 4. – P. 33–40.
15. Nakagawa, S. Meta-analytic insights into evolutionary ecology: An introduction and synthesis / S. Nakagawa, R. Poulin // *Evolutionary Ecology*. – 2012. – Vol. 26. – P. 1085–1099. – DOI: 10.1007/s10682-012-9593-z.
16. Problems of estimating forest bioproductivity in the aspect of biogeography: 1. Meta-analysis as a way of generalizing the results of independent researches / V. A. Usoltsev, S. O. R. Shobairi, J. A. Dar, V. P. Chasovskikh, E. V. Markovskaya // *Eko-Potencial*. – 2017. – Vol. 20. – No. 4. – P. 10–34. – URL: http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/7016/1/ek-4-17_03.pdf
17. Petticrew, M. Systematic reviews from astronomy to zoology : myths and misconceptions / M. Petticrew // *British Medical Journal*. – 2001. – Vol. 322. – P. 98–101.
18. Kozlov, M. V. Impact of point polluters on terrestrial ecosystems: Presentation of results in publications / M. V. Kozlov, E. L. Vorobeychik // *Russian Journal of Ecology*. – 2012. – Vol. 43. – No. 4. – P. 265–272.
19. Kofman, G. B. Growth and form of trees / G. B. Kofman. – Novosibirsk : Nauka, 1986. – 211 p.
20. Forest biomass allometry in global land surface models / A. Wolf, P. Ciais, V. Bellassen, N. Delbart, C. B. Field, J. A. Berry // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2011. – Vol. 25. – Issue 3. – GB3015. – P. 1–16. DOI:10.1029/2010GB003917.

21. Enquist, B.J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants / B. J. Enquist, K. J. Niklas // *Science*. – 2002. – Vol. 295 (5559). – P. 1517–1520. – DOI: 10.1126/science.1066360.
22. Wirth, C. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation / C. Wirth, J. Schumacher, E.-D. Schulze // *Tree Physiology*. – 2004. – Vol. 24. – P. 121–139. – DOI: 10.1093/treephys/24.2.121.
23. Usoltsev, V. A. Dummy variables and biases of allometric models when local estimating tree biomass (on an example of *Picea* L.) / V. A. Usoltsev, K. V. Kolchin, M. P. Voronov // *Eko-Potencial*. – 2017. – Vol. 17. – No. 1. – P. 22–39. – URL: <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6502/1/eko-17-02.pdf>
24. Usoltsev, V. A. Biases of generic allometric models for local estimation of larch tree phytomass / V. A. Usoltsev, K. V. Kolchin, A. A. Malenko // *Vestnik of the Altai State Agrarian University*. – 2017. – Vol. 150. – No. 4. – P. 85–90. – URL: <http://www.asau.ru/vestnik/2017/4/085-090.pdf>
25. Muukkonen, P. Biomass equations for European trees: Addendum / P. Muukkonen, R. Mäkipää // *Silva Fennica*. – 2006. – Vol. 40. – No. 4. – P. 763–773.
26. Tritton, L. M. Biomass estimation for northeastern forests / L. M. Tritton, J. W. Hornbeck // *Bulletin of the Ecological Society of America*. – 1981. – Vol. 62. – P. 106–107.
27. Pastor, J. Biomass prediction using generalized allometric regressions for some Northeast tree species / J. Pastor, J. D. Aber, J. M. Melillo // *Forest Ecology and Management*. – 1984. – Vol. 7. – P. 265–274.
28. Singh, T. Generalizing biomass equations for the boreal forest region of west-central Canada / T. Singh // *Forest Ecology and Management*. – 1986. – Vol. 17. – P. 97–107.
29. Feller, M. C. Generalized versus site-specific biomass regression equations for *Pseudotsuga menziessi* var. *menziesii* and *Thuja plicata* in Coastal British Columbia / M. C. Feller // *Bioresource Technology*. – 1992. – Vol. 39. – P. 9–16.
30. Allometry and biomass of Korean pine (*Pinus koraiensis*) in central Korea / Y. Son, J. W. Hwang, Z. S. Kim, W. K. Lee, J. S. Kim // *Bioresource Technology*. – 2001. – Vol. 78. – P. 251–255.
31. Gabeev, V.N. Biological productivity of forests near Ob river / V. N. Gabeev. – Novosibirsk: Nauka, 1976. – 171 p.
32. Land use and management of Japanese beech natural forests in east-northern district of Japan (Investigation of forest biomass and forest production) / M. Mori, M. Inuma, A. Sato, K. Saito // Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council : “Report of Comprehensive studies on conservation technology in agriculture, forestry, and Fishery environments”. – Report 5, 1979. – P. 83–93.
33. Stand biomass, net production and canopy structure in a secondary deciduous broad-leaved forest, northern Japan / K. Takahashi, K. Yoshida, M. Suzuki, T. Seino, T. Tani, N. Tashiro, T. Ishii, S. Sugata, E. Fujito, A. Naniwa, G. Kudo, T. Hiura, T. Kohyama // *Research Bulletin of the Hokkaido University Forests*. – 1999. – Vol. 56. – P. 70–85.
34. Biomass functions for the two alien tree species *Prunus serotina* Ehrh. and *Robinia pseudoacacia* L. in floodplain forests of Northern Italy / P. Annighöfer, I. Mölder, S. Zerbe, H. Kawaletz, A. Terwei, C. Ammer // *European Journal of Forest Research*. – 2012. – Vol. 131. – P. 1619–1635. – DOI: 10.1007/s10342-012-0629-2.
35. Ribe, J. H. Puckerbrush weight tables. Life Sciences and Agricultural Experiment Station / J. H. Ribe; University of Maine, Orono, MN. Miscellaneous Report 152, 1973. – 92 p.
36. Young, H. E. Weight tables for tree and shrub species in Maine / H. E. Young, J. H. Ribe, K. Wainwright; Life Sciences and Agriculture Experiment Station, University of Maine at Drone, Miscellaneous Report 230, 1980. – 84 p.
37. Busing, R. Biomass and production of southern Appalachian cove forests reexamined / R. Busing, E. Clebsch, P. White // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1993. – Vol. 23. – P. 760–765. – DOI: 10.1139/x93-100.
38. Korsun, F. Zivot normalniho porostu ve vzorcich / F. Korsun // *Lesnická Práce*. – 1935. – Vol. 14. – P. 335–342.

39. Backman, G. Drei Wachstumsfunktionen (Verhulst's, Gompertz', Backman's.) / G. Backman // Wilhelm Roux' Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen. – 1938. – Vol. 138. – P. 37–58.

40. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents / H. Poorter, A. M. Jagodzinski, R. Ruiz-Peinado, S. Kuyah, Y. Luo, J. Oleksyn, V. A. Usoltsev, T. N. Buckley, P. B. Reich, L. Sack // New Phytologist. – 2015. – Vol. 208. – Issue 3. – P. 736–749. DOI: 10.1111/nph.13571/epdf.

УДК 630*233

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА НАРУШЕННЫХ ЗЕМЛЯХ

А.С. ОПЛЕТАЕВ – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент*,
тел.: 89090005389, e-mail: opletaev.ekb@yandex.ru

Е.В. ЖИГУЛИН – аспирант*,
e-mail: eugeny13@mail.ru

В. А. КОСОВ – магистр*,
e-mail: kosovmi@mail.ru

* ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
620100, Россия, Екатеринбург, Сибирский тракт 37, кафедра лесоводства

Ключевые слова: геоинформационные системы, NDVI, нарушенные земли, лесная рекультивация, насаждение лесное, естественное лесовозобновление, искусственное лесовосстановление.

Проведено исследование данных спутниковых снимков высокого пространственного разрешения для оценки состояния лесных насаждений на нарушенных землях Свердловской области. Установлено, что применение вегетационного индекса NDVI позволяет успешно идентифицировать древесную растительность, произрастающую на отвалах вскрышных пород. Набор снимков в течение всего анализируемого года позволяет вычислить параметры активности вегетации древесной растительности на нарушенных землях. Объектом исследований являлась древесная растительность естественного происхождения, произрастающая на отвалах вскрышных пород ОАО «Уральский асбестовый горно-обогатительный комбинат». Отвалы формировались в период с 1991 по 1999 гг. На отвале «Восточный» заложены ПП № 1 (25,2 га) на верхней площадке и ПП № 2 (3,9 га) на склоне отвала. На отвале «Северо-Пролетарский» заложены ПП № 3 (4,9 га) на верхней площадке и ПП № 4 (7,8 га) на склоне отвала. Отсутствие травянистой растительности на изучаемых отвалах позволяет точно идентифицировать древесную растительность с помощью вегетационного индекса NDVI. В результате исследований установлено, что степень зарастания древесной растительностью составила от 61,6 до 69,4 % в зависимости от местоположения участка. Среднегодовая интенсивность вегетации лесных насаждений естественного происхождения на отвале «Восточный» характеризуется как средняя на всех высотных уровнях (ПП № 1 NDVI = 0,43; ПП № 2 NDVI = 0,33) а на отвале «Северо-Пролетарский» вегетация оценивается как высокая на склоне (ПП № 3 NDVI = 0,63) и хорошая на верхней площадке (ПП № 4 NDVI = 0,51). С помощью геоинформационных систем составлены карты и отражены зоны вегетации. Доля площади с низкой степенью вегетации (NDVI 0,2–0,3) наибольшая на склоне отвала (ПП № 2 – 38,4 %, ПП № 4 – 37,1 %). Данные о зонах с низкой степенью вегетации позволяют выявить локальные участки, лишенные растительности, для назначения мероприятий по рекультивации и планирования создания насаждений искусственным способом.